DOI: 10.3901/JME.2020.20.255

两种多层穿梭车系统的性能比较分析*

秦彩云 吴颖颖 吴耀华 刘紫薇
(山东大学控制科学与工程学院 济南 250061)

摘要: 物流配送中心订单响应速度的加快,对订单拣选系统提出了更高的要求。多层穿梭车系统因其柔性强、效率高等特点,近年来得到了广泛应用。多层穿梭车系统具有两种形式——基于转载车和基于环形输送线,二者均可实现货物的快速拣选,但在系统吞吐量和订单完成周期方面存在差异,致使企业决策者难以进行系统选择。基于上述原因,本文比较两种多层穿梭车系统的性能差异。建立两个系统的开环排队网络模型,然后求解系统吞吐量、订单完成周期,通过仿真验证了排队论模型的准确性,通过试验对两种系统的性能进行对比分析。结果表明,系统吞吐量与层数、巷道数相关,层数越多,巷道数越少,转载车系统相对于环线系统优势越显著;订单完成周期与层数、订单到达率相关,层数越多,订单到达率越低,转载车系统相对于环线系统越具优势。

关键词: 多层穿梭车系统;转载车;环形输送线;开环排队网络;系统性能

中图分类号: TP29

Comparative Analysis of Performance for Two Kinds of Automated Vehicle Storage/Retrieval Systems

QIN Caiyun WU Yingying WU Yaohua LIU Ziwei
(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061)

Abstract: The quicker responding time of orders demands a more efficient order fulfilment system in the distribution centre. The automated vehicle storage/retrieval system (AVS/RS) has been widely used in recent years due to its flexibility and high efficiency. The AVS/RS has two mechanical structures – one is based on cross-aisle shuttles and another is based on a ring-shaped conveyor. Both of above systems can fulfill the orders rapidly, however, there are differences in two aspects including the system throughput and order cycle time which makes the warehouse manager hard to make decision when choosing the systems. Based on the above reasons, this paper compares the performance differences of two kinds of AVS/RS. The open queuing network models of two systems are built, and then the system throughput and order cycle time are calculated. The open queuing network models are verified by simulation. The performance of the two systems are compared. The results show that the system throughput is related to the number of tiers and lanes of AVS/RS. The AVS/RS with cross-aisle has more advantages when there are more tiers and fewer lanes. Similarly, the order cycle time is related to the number of tiers and order arrival rate. The AVS/RS with cross-aisle has more advantages when there are more tiers and smaller order arrival rate.

Key words: automated vehicle storage/retrieval system; cross-aisle shuttle; ring-shaped conveyor; open queuing network; system performance

0 前言

随着电子商务的快速发展,物流配送中心的订

单呈现出多品种、小批量且需快速响应的趋势,对拣选系统提出了更高的要求。多层穿梭车系统^[1](Automated vehicle storage/retrieval system, AVS/RS)因其高效性、精准性等特点,近年来得到广泛应用。通常,多层穿梭车系统由巷道穿梭车(简称为巷道车)和提升机构成,但该结构形式的系统需要在拣选完成后进行合单操作,导致操作人员多、拣选周期长。

* 国家自然科学基金资助项目(61703241)。20191009 收到初稿,20200312 收到修改稿

随着电商企业规模的不断扩大,其销售货物品种逐渐增加,单个订单所需货物在多个巷道中并存的现象越来越多,合单操作越来越普遍,急需一种新的系统来避免拣后合单。在此背景下,两种新型多层穿梭车系统应运而生:一种基于转载车^[2](转载车系统),另一种基于环形输送线(环线系统)。两者均可避免拣后合单,不同之处在于前者在每层货架上均放置一台转载车,用于实现不同巷道和拣选台之间的货物输送;后者通过底层环形输送线实现不同巷道和拣选台之间的货物输送。由于二者在机械结构等方面不同,致使其在系统吞吐量和订单完成周期方面也存在差异。目前鲜见文献对两种系统进行性能比较分析,因此企业决策者难以进行系统选择。基于上述原因,在不同订单输入下,对比二者性能,为企业提供决策支持极为重要。

目前在 AVS/RS 系统性能方面,国内外文献大多集中在由巷道车和提升机组成的系统上。MARCHET 等^[3-4]建立了 AVS/RS 巷道车和提升机出库作业周期时间模型,并基于仓库设计、系统性能、成本提出了系统设计框架。EKREN 等^[5-7]进行了 AVS/RS 仿真试验设计,提出驻留点策略、调度规则、输入/输出位置会影响系统性能,并建立半开环排队网络模型来分析 AVS/RS 的性能。HERAGU 等^[8]采用开环排队网络对 AVS/RS 建模。FUKUNARI 等^[9]采用闭环排队网络对 AVS/RS 建模。ZOU 等^[10]提出了基于 fork-join 排队网络分解的近似方法来估计系统性能。TONE 等^[11]提出了基于双指令作业的订单完成周期模型,并考虑了提升机和巷道车的运行特性,如加速度、减速度和最大速度。

对基于转载车的 AVS/RS 的研究,李斌等^[12]研究了 AVS/RS 的工作原理,杨玮等^[13]研究分析了 AVS/RS 的作业流程。

综上所述,以往对 AVS/RS 的研究,大多不包含转载车和环形输送线,仅有的包含转载车的文献也只对系统的作业流程和原理进行阐述,未对性能进行深入分析。本文以基于转载车和环形输送线的 AVS/RS 为研究对象,分别建立开环排队网络模型并进行求解,通过试验对两种系统在不同系统配置(系统层数、巷道数)和订单到达率下的性能进行对比分析。

1 系统介绍

1.1 转载车系统

转载车系统以料箱为存储单元,由巷道车、

转载车、提升机、拣选台和输送缓存区组成。每层每巷道均配置一台巷道车,每层配置一台转载车,每两台提升机(分别负责出库和入库)对应一个拣选台。巷道车负责料箱在单个巷道单层的水平运动,转载车负责不同巷道间的水平运动,提升机负责不同层之间的垂直运动,输送缓存区负责暂存出入库过程中的料箱。系统俯视图与出入库流程如图 1 所示,其中虚线为入库流程,实线为出库流程。

图1 转载车系统

系统执行出库任务时,首先由巷道车叉取料箱,将其运送至巷道车出库缓存区;然后由转载车将其运送至转载车出库缓存区,再由提升机将料箱运送至提升机出库缓存区;最后在拣选台完成拣选。系统执行入库任务时,料箱首先从拣选台进入提升机入库缓存区,由提升机将料箱运送至转载车入库缓存区;然后由转载车将其运送至巷道车入库缓存区;最后由巷道车将料箱运送至指定货位。

1.2 环线系统

环线系统以料箱为存储单元,由巷道车、提升机、环形输送线、拣选台和输送缓存区组成。每层每巷道均配置一台巷道车,每巷道对应两台提升机(分别负责出库和入库),环形输送线仅布置在一层,负责料箱在不同提升机和拣选台之间的输送。系统俯视图与出入库流程如图 2 所示,其中虚线代表入库流程,实线代表出库流程。

系统执行出库任务时,首先由巷道车叉取料箱,将其运送至巷道车出库缓存区,然后由提升机将其运送至提升机出库缓存区,并进入环形输送线,最后料箱随环形输送线进入环形输送线出库缓存区,

在拣选台完成拣选。系统执行入库任务时, 料箱首先从拣选台进入环形输送线入库缓存区, 由环形输送线将料箱运送至提升机入库缓存区; 然后由提升机将料箱运送至巷道车入库缓存区; 最后由巷道车将料箱运送至指定货位。

图2 环线系统

2 多层穿梭车系统开环排队网络模型

本文系统变量定义如表1所示。

表1 系统变量定义

变量	释义	变量	释义
a	系统巷道数量	$\mu_{AS}^{i,j}$	第 i 层 j 巷道巷道车的服务率, $1 \leq i \leq t, 1 \leq j \leq a$
c	系统列数, 即单层单排货架存储单元数量	μ_{AS}	巷道车的平均服务率
t	系统层数	μ_{CAS}^i	第 i 层转载车的服务率, $1 \leq i \leq t$
l	提升机数量	μ_{CAS}	转载车的平均服务率
w	拣选台数量	μ_R	环形输送线的平均服务率
V_0	环形输送线匀速运行速度	μ_L^k	第 k 台提升机的服务率, $1 \leq k \leq l$
W_b	单个料箱在辊道输送线上所需的长度	μ_L	提升机的平均服务率
C_m	存储容量, 即 $2act$	μ_w^m	第 m 个拣选台的服务率, $1 \leq m \leq w$
C_w	货格宽度	μ_w	拣选台的平均服务率
H_s	层高 $1 \leq i \leq t, 1 \leq j \leq a$	$\lambda_{AS}^{i,j}$	第 i 层 j 巷道巷道车的订单到达率, $1 \leq i \leq t, 1 \leq j \leq a$
t_{p1}	巷道车取放料箱的时间	λ_{CAS}^i	第 i 层转载车的订单到达率, $1 \leq i \leq t$
t_{p2}	转载车取放料箱的时间	λ_L^k	第 k 台提升机的订单到达率, $1 \leq k \leq l$
t_{p3}	提升机取放料箱的时间	λ_w^m	第 m 个拣选台的订单到达率, $1 \leq m \leq w$
λ	系统订单到达率	λ_R	环形输送线的订单到达率

为简化模型, 本文对 AVS/RS 提出以下假设:

- ① 料箱回库时, 遵循随机货位分配策略;
- ② 可移动系统设备即巷道车、转载车和提升机的停靠点为上次出入库作业完成点;
- ③ 订单服从先到先服务原则;
- ④ 本文把单位时间订单到达的数量(即订单到达率)作为系统输入, 不研究订单到达的具体时间, 因此将订单到达表示为泊松分布;
- ⑤ 拣选人员单位时间拣货数量和拣选速度基本固定, 但考虑到人为因素影响, 拣选台服务时间在一定范围内波动, 且在该范围内服从均匀分布;
- ⑥ 参考以往的仓库设备运行数据, 可移动系统设备服务时间遵循一般分布;
- ⑦ 输送缓存区容量足够大;
- ⑧ 一个料箱仅存放一种商品, 一种商品也仅存放在一个料箱里。

2.1 转载车系统开环排队网络模型

基于上述假设, 建立转载车系统开环排队网络模型, 如图3所示。当系统执行出库任务时, 订单到达率 λ 是系统输入, 同时也是巷道车的输入; 巷道车的输出是转载车的输入; 转载车的输出是提升机的输入; 提升机的输出是拣选台的输入。反之, 当系统执行入库任务时, 拣选台的输出是提升机的输入; 提升机的输出是转载车的输入; 转载车的输出是巷道车的输入。

订单到达服从泊松分布, 巷道车、转载车和提升机的服务时间服从一般分布, 拣选台的服务时间服从均匀分布, 因此巷道车、转载车、提升机、拣选台与对应输送缓存区, 构成 M/G/1 队列。

2.2 环线系统开环排队网络模型

基于上述假设, 建立环线系统开环排队网络模型, 如图4所示。当系统执行出库任务时, 订单到达率 λ 是系统输入, 同时也是巷道车的输入; 巷道车的输出是提升机的输入; 提升机的输出是环形输送线的输入; 环形输送线的输出是拣选台的输入。反之, 当系统执行入库任务时, 拣选台的输出是环形输送线的输入; 环形输送线的输出是提升机的输入; 提升机的输出是巷道车的输入。

与转载车系统相同, 环线系统排队网络模型中, 巷道车、提升机、环形输送线、拣选台与对应输送缓存区, 构成 M/G/1 队列。

图 3 转载车系统开环排队网络模型

图 4 环线系统开环排队网络模型

3 AVS/RS 性能分析

AVS/RS 系统性能包括吞吐量和订单完成周期。吞吐量是指单位时间内系统的订单处理量，订单完成周期是指订单从开始出库到拣选结束的时间。

由系统工作流程可知，系统性能由出库流程和入库流程共同决定，而系统入库流程与出库流程完全相反，本文仅考虑出库流程下的系统吞吐量及订单完成周期，对两种系统进行性能比较分析。

系统非决策变量定义见表 2。

表 2 系统非决策变量定义

变量	释义	变量	释义
t_{AS}^w	料箱等待巷道车服务的平均时间	t_w^s	拣选台的平均服务时间
t_{CAS}^w	料箱等待转载车服务的平均时间	t_R^s	环形输送线的平均服务时间
t_L^w	料箱等待提升机服务的平均时间	τ_{AS}	巷道车吞吐量
t_R^w	料箱等待环形输送线服务的平均时间	τ_{CAS}	转载车吞吐量
t_W^w	料箱等待拣选台服务的平均时间	τ_L	提升机吞吐量
t_{AS}^s	巷道车的平均服务时间	τ_W	拣选台吞吐量
t_{CAS}^s	转载车的平均服务时间	τ_R	环形输送线吞吐量
t_L^s	提升机的平均服务时间		

系统决策变量定义见表 3。

表 3 系统决策变量定义

变量	释义
τ_{m1}	转载车系统吞吐量
τ_{m2}	环线系统吞吐量
t_{m1}	转载车系统订单完成周期
t_{m2}	环线系统订单完成周期

3.1 转载车系统性能分析

3.1.1 转载车系统吞吐量

转载车系统吞吐量为巷道车、转载车、提升机和拣选台四种设备吞吐量的最小值, 即

$$\tau_{m1} = \min(\tau_{AS}, \tau_{CAS}, \tau_L, \tau_W) \quad (1)$$

$$\tau_{AS} = \mu_{AS} at = \frac{at}{t_{AS}^s} \quad (2)$$

$$\tau_{CAS} = \mu_{CAS} t = \frac{t}{t_{CAS}^s} \quad (3)$$

$$\tau_L = \mu_L l = \frac{l}{t_L^s} \quad (4)$$

$$\tau_W = \mu_W w = \frac{w}{t_W^s} \quad (5)$$

巷道车的服务时间包括三部分: ① 从输送缓存区(定义输送缓存区为第 0 列)或货位任一系列, 统称为 j ($0 \leq j \leq c$) 列, 到货位第 i ($1 \leq i \leq c$) 列取料箱行走的时间 $T_{AS}^s(j, i)$ (如式(6)所示); ② 将料箱从第 i 列运送至输送缓存区行走的时间 $T_{AS}^s(i, 0)$ (式(7)); ③ 取、放料箱的时间 t_{p1} 。根据巷道车的行驶距离和速度变化情况, 分两种情况考虑, 第一种情况为巷道车在行走时间 t 内达到高速, 第二种情况为巷道车未达到高速, 分别如图 5a、5b 所示, 其中 a_{AS} 和 $V_{AS}^{\max}$ 分别为巷道车的加速度和最大速度。

图 5 巷道车的速度变化

巷道车从输送缓存区或货位任一系列 j ($0 \leq j \leq c$) 到货位第 i ($1 \leq i \leq c$) 列取料箱行走的时间为

$$T_{AS}^s(j, i) = \begin{cases} 2\sqrt{|j-i|\frac{C_W}{a_{AS}}} & 0 \leq |j-i| < n_d \\ 2\frac{V_{AS}^{\max}}{a_{AS}} + \frac{|j-i|C_W - \frac{V_{AS}^{\max 2}}{a_{AS}}}{V_{AS}^{\max}} & n_d \leq |j-i| \leq c \end{cases} \quad (6)$$

式中, n_d 为巷道车达到最大速度时的列数,

$$n_d = \left\lceil \frac{V_{AS}^{\max 2}}{a_{AS} C_W} \right\rceil$$

巷道车将料箱从第 i 列运送至输送缓存区行走的时间为

$$T_{AS}^s(i, 0) = \begin{cases} 2\sqrt{i\frac{C_W}{a_{AS}}} & 1 \leq i < n_d \\ 2\frac{V_{AS}^{\max}}{a_{AS}} + \frac{iC_W - \frac{V_{AS}^{\max 2}}{a_{AS}}}{V_{AS}^{\max}} & n_d \leq i \leq c \end{cases} \quad (7)$$

式中, n_d 与式(6)中 n_d 取值相同。

巷道车从第 i 列取料箱的时间为

$$t_{AS}^s(i) = \frac{1}{2}T_{AS}^s(0, i) + \sum_{j=1}^c \frac{1}{2c}T_{AS}^s(j, i) + T_{AS}^s(i, 0) + 2t_{p1} \quad (8)$$

巷道车的平均服务时间为

$$t_{AS}^s = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c t_{AS}^s(i) \quad (9)$$

转载车的服务时间包括: 从停靠点, 即第 i ($1 \leq i \leq l$) 个提升机到第 j ($1 \leq j \leq a$) 个巷道输送缓存区取料箱行走的时间 $t_{i,j}$ (式(10)); 将料箱运送至第 k ($1 \leq k \leq l$) 个提升机行走的时间 $t_{j,k}$ (式(11)); 取、放料箱的时间 t_{p2} 。

$$t_{i,j} = \begin{cases} 2\sqrt{\frac{d_{i,j}}{a_{CAS}}} & d_{i,j} \leq \frac{V_{CAS}^{\max 2}}{a_{CAS}} \\ 2\frac{V_{CAS}^{\max}}{a_{CAS}} + \frac{d_{i,j} - \frac{V_{CAS}^{\max 2}}{a_{CAS}}}{V_{CAS}^{\max}} & d_{i,j} > \frac{V_{CAS}^{\max 2}}{a_{CAS}} \end{cases} \quad (10)$$

$$t_{j,k} = \begin{cases} 2\sqrt{\frac{d_{j,k}}{a_{CAS}}} & d_{j,k} \leq \frac{V_{CAS}^{\max 2}}{a_{CAS}} \\ 2\frac{V_{CAS}^{\max}}{a_{CAS}} + \frac{d_{j,k} - \frac{V_{CAS}^{\max 2}}{a_{CAS}}}{V_{CAS}^{\max}} & d_{j,k} > \frac{V_{CAS}^{\max 2}}{a_{CAS}} \end{cases} \quad (11)$$

式(10)、(11)中, a_{CAS} 和 $V_{CAS}^{\max}$ 分别为转载车的加速度和最大速度, $d_{i,j}$ 和 $d_{j,k}$ 分别为转载车从第 i 个提升机到第 j 个巷道输送缓存区取料箱的距离和从第 j 个巷道输送缓存区到第 k 个提升机送料箱的距离。

转载车从第 j 个巷道出库缓存区取料箱的时间为

$$t_{CAS}^S(i, j, k) = t_{i,j} + t_{j,k} + 2t_{p2} \quad (12)$$

$$1 \leq i \leq l \quad 1 \leq j \leq a \quad 1 \leq k \leq l$$

转载车的平均服务时间为

$$t_{CAS}^S = \frac{1}{al^2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^a \sum_{k=1}^l t_{CAS}^S(i, j, k) \quad (13)$$

提升机的服务时间包括: 从第 1 层到第 i ($1 \leq i \leq t$) 层取料箱行走的时间 $T_L^S(i)$ (式(14)); 从第 i 层到第 1 层送料箱行走的时间 $T_L^S(i)$; 取、放料箱的时间 t_{p3} 。

$$T_L^S(i) = \begin{cases} 2\sqrt{(i-1)\frac{H_S}{a_L}} & 1 \leq i \leq n_l \\ 2\frac{V_L^{\max}}{a_L} + \frac{(i-1)H_S - \frac{V_L^{\max 2}}{a_L}}{V_L^{\max}} & n_l \leq i \leq t \end{cases} \quad (14)$$

式中, a_L 和 $V_L^{\max}$ 分别为提升机的加速度和最大速度, n_l 为提升机达到最大速度时需要的层数且

$$n_l = \left\lceil \frac{V_L^{\max 2}}{a_L H_S} \right\rceil。$$

提升机从第 i 层取料箱的时间

$$t_L^S(i) = 2T_L^S(i) + 2t_{p3} \quad (15)$$

提升机的平均服务时间

$$t_L^S = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t t_L^S(i) \quad (16)$$

3.1.2 转载车系统订单完成周期

转载车系统订单完成周期为服务机构(巷道车、转载车、提升机和拣选台)的服务时间与等待时间的总和, 即

$$t_{m1} = t_{AS}^S + t_{CAS}^S + t_L^S + t_W^S + t_{AS}^W + t_{CAS}^W + t_L^W + t_W^W \quad (17)$$

由于巷道车、转载车、提升机、拣选台与各自的输送缓存区, 构成 M/G/1 排队模型, 因此可利用

波拉泽克-辛钦(Pollaczek-Khintchine)公式^[14]得出服务机构的队长和等待时间, 分别如式(18)、(19)所示

$$L_S = \frac{2\rho - \rho^2 + \lambda^2 \sigma^2}{2(1-\rho)} \quad (18)$$

$$t^w = \frac{\rho^2 + \lambda^2 \sigma^2}{2\lambda(1-\rho)} \quad (19)$$

式中, ρ 和 σ^2 分别为服务机构(巷道车、转载车、提升机、环形输送线和拣选台)的利用率和服务时间方差, $\rho = \lambda/\mu$, $\sigma^2 = \sum_k [t - E(t)]^2 P_k$, λ 为订单到达率; μ 为单位时间内完成的订单数, 其值为平均服务时间的倒数; t 为每个服务机构单个订单完成时间(巷道车、转载车、提升机、拣选台对应值分别为 $t_{AS}^S(i)$ 、 $t_{CAS}^S(i, j, k)$ 、 $t_L^S(i)$ 、 t_W^S), $E(t)$ 为服务机构平均服务时间, P_k 为每个订单到达的概率, k 为到达系统的订单编号。

将式(19)应用至转载车系统中, 可得料箱等待巷道车服务的时间为

$$t_{AS}^W = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^a \frac{\rho_{AS}^{i,j2} + \lambda_{AS}^{i,j2} \sigma_{AS}^2}{2\lambda_{AS}^{i,j}(1-\rho_{AS}^{i,j})} P_{AS}^{i,j} \quad (20)$$

式中, $P_{AS}^{i,j}$ 、 $\lambda_{AS}^{i,j}$ 、 $\rho_{AS}^{i,j}$ 和 σ_{AS}^2 分别为第 i 层 j 巷道巷道车取料箱的概率、订单到达率、利用率和服务时间方差, 由于本文中的 AVS/RS 遵循随机存取原则, 因此 $P_{AS}^{i,j} = \frac{1}{at}$, $\lambda_{AS}^{i,j} = P_{AS}^{i,j} \lambda$, $\rho_{AS}^{i,j} = \frac{\lambda_{AS}^{i,j}}{\mu_{AS}^{i,j}}$,

$$\sigma_{AS}^2 = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c [t_{AS}^S(i) - t_{AS}^S]^2。$$

料箱等待转载车服务的时间为

$$t_{CAS}^W = \sum_{i=1}^t \frac{\rho_{CAS}^{i2} + \lambda_{CAS}^{i2} \sigma_{CAS}^2}{2\lambda_{CAS}^i(1-\rho_{CAS}^i)} P_{CAS}^i \quad (21)$$

式中, P_{CAS}^i 、 λ_{CAS}^i 、 ρ_{CAS}^i 和 σ_{CAS}^2 分别为第 i 层转载车取料箱的概率、订单到达率、利用率和服务时间方差, 由于本文中的 AVS/RS 遵循随机存取原则, 因此 $P_{CAS}^i = \frac{1}{t}$, $\lambda_{CAS}^i = P_{CAS}^i \lambda$, $\rho_{CAS}^i = \frac{\lambda_{CAS}^i}{\mu_{CAS}^i}$,

$$\sigma_{CAS}^2 = \frac{1}{al^2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^a \sum_{k=1}^l [t_{CAS}^S(i, j, k) - t_{CAS}^S]^2。$$

料箱等待提升机服务的时间

$$t_L^W = \sum_{k=1}^l \frac{\rho_L^{k2} + \lambda_L^{k2} \sigma_L^2}{2\lambda_L^k(1-\rho_L^k)} P_L^k \quad (22)$$

式中, P_L^k 、 λ_L^k 、 ρ_L^k 和 σ_L^2 分别为第 k 个提升机取料箱的概率、订单到达率、利用率和服务时间方差, 由于本文中的 AVS/RS 遵循随机存取原则, 因此

$$P_L^k = \frac{1}{l}, \lambda_L^k = P_L^k \lambda, \rho_L^k = \frac{\lambda_L^k}{\mu_L^k}, \sigma_L^2 = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^l [t_L^S(i) - t_L^S]^2.$$

料箱等待拣选台服务的时间为

$$t_W^m = \sum_{m=1}^w \frac{\rho_W^{m2}}{2\lambda_W^m(1-\rho_W^m)} P_W^m \quad (23)$$

式中, P_W^m 、 λ_W^m 和 ρ_W^m 分别为第 m 个拣选台进行拣选作业的概率、订单到达率和利用率, 由于本文中的 AVS/RS 遵循随机存取原则, 因此 $P_W^m = \frac{1}{w}$,

$$\lambda_W^m = P_W^m \lambda, \rho_W^m = \frac{\lambda_W^m}{\mu_W^m}.$$

3.2 环线系统性能分析

3.2.1 环线系统吞吐量

环线系统吞吐量为巷道车、提升机、环形输送线和拣选台的吞吐量的最小值, 即

$$\tau_{m2} = \min(\tau_{AS}, \tau_L, \tau_R, \tau_W) \quad (24)$$

式中, τ_{AS} 、 τ_L 、 τ_W 的求解与转载车系统相同, 分别见式(2)、(4)、(5)。

环形输送线的吞吐量为

$$\tau_R = \frac{V_0}{W_b} \quad (25)$$

3.2.2 环线系统订单完成周期

环线系统订单完成周期为巷道车、提升机、环形输送线和拣选台的服务时间与等待时间的总和, 即

$$t_{m2} = t_{AS}^S + t_L^S + t_R^S + t_W^S + t_{AS}^W + t_L^W + t_R^W + t_W^W \quad (26)$$

式中, 由于 t_{AS}^S 、 t_L^S 、 t_W^S 、 t_{AS}^W 、 t_L^W 、 t_W^W 的求解与转载车系统相同, 因此只需求解 t_R^S 和 t_R^W 即可。

料箱从第 i ($1 \leq i \leq l$) 个提升机进入第 j ($1 \leq j \leq w$) 个拣选台的行走时间为

$$t_R^S(i, j) = \frac{l_{i,j}}{V_0} \quad (27)$$

式中, $l_{i,j}$ 为环形输送线上第 i 个出库提升机口到第 j 个拣选台口的距离。

环形输送线对单个料箱的服务时间

$$t_R^S = \frac{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^w t_R^S(i, j)}{lw} \quad (28)$$

料箱等待环形输送线服务的平均时间

$$t_R^W = \frac{\rho_R^2}{2\lambda_R(1-\rho_R)} \quad (29)$$

式中, λ_R 和 ρ_R 分别为环形输送线的订单到达率和利用率, 即 $\lambda_R = \lambda$, $\rho_R = \frac{\lambda_R}{\mu_R}$ 。

4 仿真试验

4.1 模型验证

为验证转载车系统和环线系统模型的正确性, 对两系统分别进行仿真。随机抽取某电商企业 2018 年中的 6 天订单数据, 将订单到达时间拟合泊松分布, 通过 Flexsim 软件进行仿真。假设转载车系统和环线系统均有 6 个巷道, 80 列, 10 层, 6 个出/入库提升机, 6 个拣选台, 其他系统参数如表 4 所示。

表 4 系统参数

参数	值
巷道车最大速度 $V_{AS}^{\max}$ /(m/s)	1.00
巷道车加速度 a_{AS} /(m/s ²)	1.00
转载车最大速度 $V_{CAS}^{\max}$ /(m/s)	1.50
转载车加速度 a_{CAS} /(m/s ²)	1.00
提升机最大速度 $V_L^{\max}$ /(m/s)	3.00
提升机加速度 a_L /(m/s ²)	2.00
巷道车取放货时间 t_{p1} /s	3.00
转载车取放货时间 t_{p2} /s	3.00
提升机取放货时间 t_{p3} /s	3.00
拣选台单个料箱平均服务时间 t_w^S /s	10.00
货格(一个存储位置)宽度 C_w /m	0.60
货格(一个存储位置)深度 C_l /m	0.80
环形输送线匀速运行速度 V_0 /(m/s)	0.50
仓储货架层高 H_s /m	0.50
单个料箱在辊道输送上所需的长度 W_b /m	1.00

4.1.1 转载车系统模型验证

按照系统参数, 建立转载车系统仿真模型, 将系统的排队网络模型求解结果与仿真结果进行对比分析, 如表 5 所示。

表 5 转载车系统排队网络模型与仿真结果对比

组别	订单到达率 /(订单量/时间)	排队网络模型		仿真	
		最大吞吐量/箱	订单完成周期/s	吞吐量/箱	订单完成周期/s
1	1 443	2 068	156	1 443	165
2	1 747	2 068	215	1 747	229
3	1 632	2 068	185	1 632	196
4	1 509	2 068	164	1 509	173
5	1 161	2 068	132	1 161	139
6	2 189	2 068	Inf	2 057	1 535

在6组试验中,排队网络模型的最大吞吐量均为2 068箱/h,因此当订单到达率不大于2 068箱/h,系统实际吞吐量等于订单到达率,反之等于最大吞吐量。在前5组试验中,排队网络模型与仿真结果中的实际吞吐量相同;第6组试验中,订单到达率达到系统最大吞吐量,二者的吞吐量差别仅为5.3%,因此可认为排队网络模型与仿真结果的吞吐量基本一致。同时,二者的订单完成周期差别为5.0%~6.1%,方差为5.60,可认为二者的订单完成周期一致。

综上所述,系统排队网络模型与仿真结果无显著差别。

4.1.2 环线系统模型验证

按照系统参数,建立环线系统仿真模型,将系统的排队网络模型求解结果与仿真结果进行对比分析,如表6所示。

在6组试验中,排队网络模型的最大吞吐量均为1 800箱/小时,因此当订单到达率不大于1 800箱/小时时,系统实际吞吐量等于订单到达率,反之等于最大吞吐量。在前5组试验中,排队网络模型与仿真结果中的实际吞吐量相同;第6组试验中,订单到达率达到系统最大吞吐量,二者的吞吐量差别仅为6.7%,因此可认为排队网络模型与仿真结果的吞吐量基本一致。同时,二者的订单完成周期差别为4.2%~6.6%,方差为4.96,可认为二者的订单完成周期一致。

表6 环线系统排队网络模型与仿真结果对比

组别	订单到达率/ (订单量/时间)	排队网络模型		仿真	
		最大吞吐量/ 箱	订单完成 周期/s	吞吐量/箱	订单完成 周期/s
1	1 443	1 800	154	1 443	161
2	1 747	1 800	183	1 747	196
3	1 632	1 800	169	1 632	178
4	1 509	1 800	158	1 509	165
5	1 161	1 800	139	1 161	147
6	2 189	1 800	Inf	1 788	1 869

综上所述,系统排队网络模型与仿真结果无显著差别。

4.2 系统性能比较分析

对转载车系统和环线系统进行吞吐量和订单完成周期分析,并对两系统进行比较。

4.2.1 吞吐量比较分析

令 $\tau^* = \min(\tau_{AS}, \tau_L, \tau_W)$,则两系统吞吐量可表示为 $\tau_{m1} = \min(\tau^*, \tau_{CAS})$ 和 $\tau_{m2} = \min(\tau^*, \tau_R)$ 。当 $\tau_{CAS} < \tau_R$

时,则 $\tau_{m1} \leq \tau_{m2}$ 成立;反之当 $\tau_{CAS} > \tau_R$ 时,则 $\tau_{m1} \geq \tau_{m2}$ 成立,因此可将两系统吞吐量比较问题转化为转载车和环形输送线吞吐量比较问题。由式(3)、(12)、(13)可知,在巷道宽度一定的情况下, τ_{CAS} 与货架层数、巷道数有关;由式(25)可知, τ_R 仅与环形输送线速度相关。

在环线系统中,当环形输送线速度为定值0.5 m/s时,可得到环形输送线吞吐量为1 800箱/时。在转载车系统中,将货架层数由3增至20,巷道数由2增至10,由 τ_{CAS} 数学模型,可得到162种结果。162种 τ_{CAS} 和 τ_R 的对比结果,如图6所示,其中圆圈表示 $\tau_{CAS} < \tau_R$,即 $\tau_{m1} \leq \tau_{m2}$;星号表示 $\tau_{CAS} > \tau_R$,即 $\tau_{m1} \geq \tau_{m2}$ 。

由图6可知以下几点。

(1) 当巷道数固定,层数从3变化到20时, τ_{CAS} 呈上升趋势;巷道数越小, τ_{CAS} 随层数的递增加上升趋势越明显。当层数固定,巷道数从2变化到10时, τ_{CAS} 呈下降趋势;层数越大, τ_{CAS} 随巷道数的递加下降趋势越明显。

(2) 层数为[3, 5]时, τ_{CAS} 在(465, 1 547)之间, $\tau_{m1} \leq \tau_{m2}$,环线系统更优;当层数由6增到11时, $\tau_{m1} \leq \tau_{m2}$ 占的比例逐渐变小;当层数为[12, 20]时, τ_{CAS} 在(1 863, 6 189)之间, $\tau_{m1} > \tau_{m2}$,转载车系统更优。因此,层数越低,环线系统优势越大;层数越高,转载车系统优势越大。

(3) 当巷道数由2变至10时,随着巷道数的增加, $\tau_{m1} \leq \tau_{m2}$ 占的比例逐渐变大,环线系统优势越来越大。因此,巷道数较少时,转载车系统更优;巷道数较多时,环线系统更优。

图6 两系统吞吐量比较结果

4.2.2 订单完成周期比较分析

转载车系统和环线系统的订单完成周期差值为 $t_{m1} - t_{m2} = t_{CAS}^S + t_{CAS}^W - t_R^S - t_R^W$,因此可将两系统订单完成周期的比较问题转化为转载车和环形输送线作业时间(服务时间和等待时间之和)比较问题。由式(3)、(12)、(13)、(21)、(25)、(28)、(29)可知, t_{m1} 与 t_{m2} 的

差值与订单到达率、货架层数、巷道数有关。

在订单到达率由 0 增至 2 000(变化间隔为 500) 订单/时, 巷道数量由 2 增至 10, 层数由 3 增至 20 时, 计算 $t_{m1} - t_{m2}$ 。若 $t_{m1} - t_{m2} < 0$, 在图中用星号表示; 反之用圆圈表示, 经试验得到 960 条数据, 试验结果如图 7a~7d 所示。

图7 不同巷道数、层数、订单到达率下两系统
作业时间差值试验结果

分析图 7a~7d 可知以下几点。

(1) $t_{m1} > t_{m2}$ 的数据在图 7a~7d 四幅图中的比例分别为 40%、40.74%、0% 和 4.17%。其中, 图 7a 与图 7b 中比例相近, 图 7c 与图 7d 中比例相近。

(2) 比较图 7a 与图 7c 可知: 在巷道数和订单到达率一定的情况下, 层数越多, 转载车系统订单完成周期越短。对比图 7b 与图 7d 可得出相同结论。

(3) 比较图 7a 和图 7b 可知: 在层数和巷道数一定的情况下, 订单到达率越大, 环线系统订单完成周期越短。

(4) 将图 7a 和图 7b, 图 7c 和图 7d 分别进行比较可知: 在层数和订单到达率一定的情况下, 巷道数对两系统作业时间的影响表现不明显, 这是由于巷道数对转载车作业时间和环形输送线作业时间均有影响, 且影响程度差别较小。

5 结论

(1) 本文建立了转载车系统和环线系统的开环排队网络模型, 并运用仿真对模型进行了验证。

(2) 系统吞吐量受层数、巷道数影响。层数越多, 巷道数越少, 转载车系统相对于环线系统吞吐量方面优势越显著。反之, 层数越少, 巷道数越多, 环线系统优势越显著。

(3) 订单完成周期受层数、订单到达率影响。层数越多, 订单到达率越小, 转载车系统相对于环线系统订单完成周期越短。反之, 层数越少, 订单到达率越大, 环线系统订单完成周期越短。

参 考 文 献

- [1] 侯诣卓. 多层穿梭车系统解决方案[J]. 现代制造, 2008(45): 20.
HOU Yizhuo. Multi-shuttle system solution [J]. Modern Manufacturing, 2008(45): 20.
- [2] 马文凯, 吴耀华, 吴颖颖, 等. 基于进化算法的跨巷道多层穿梭车仓储系统的研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 216-224.
MA Wenkai, WU Yaohua, WU Yingying, et al. Research on cross-aisles multi-shuttle warehouse system based on evolutionary algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 216-224.
- [3] MARCHET G, MELACINI M, PEROTTI S, et al. Analytical model to estimate performances of autonomous vehicle storage and retrieval systems for product totes[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(24): 7134-7148.

- [4] MARCHET G, MELACINI M, PEROTTI S, et al. Development of a framework for the design of autonomous vehicle storage and retrieval systems[J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(14): 4365-4387.
- [5] EKREN B Y, HERAGU S S, Krishnamurthy A, et al. Simulation based experimental design to identify factors affecting performance of AVS/RS[J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 58(1): 175-185.
- [6] EKREN B Y, HERAGU S S, KRISHNAMURTHY A, et al. An approximate solution for semi-open queueing network model of an autonomous vehicle storage and retrieval system[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2013, 10(1): 205-215.
- [7] EKREN B Y, HERAGU S S, KRISHNAMURTHY A, et al. Matrix-geometric solution for semi-open queueing network model of autonomous vehicle storage and retrieval system[J]. Computers & Industrial Engineering, 2014, 68(1): 78-86.
- [8] HERAGU S S, CAI X, KRISHNAMURTHY A, et al. Analytical models for analysis of automated warehouse material handling systems[J]. International Journal of Production Research, 2011, 49(22): 6833-6861.
- [9] FUKUNARI M, MALMBORG C J. A network queueing approach for evaluation of performance measures in autonomous vehicle storage and retrieval systems[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 193(1): 152-167.
- [10] ZOU B, XU X, GONG Y, et al. Modeling parallel movement of lifts and vehicles in tier-captive vehicle-based warehousing systems[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 254(1): 51-67.
- [11] TONE LERHER, BANU Y. EKREN, GORAN DUKIC, et al. Travel time model for shuttle-based storage and retrieval systems[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(9-12): 1705-1725.
- [12] 李斌, 魏鑫, 张敬敏, 等. 货到人自动拣选系统研发及其工程应用[J]. 制造业自动化, 2017, 39(9): 149-152, 156.
- LI Bin, WEI Xin, ZHANG Jingmin, et al. Research and application of arrival and picking system[J]. Manufacturing Automation, 2017, 39(9): 149-152, 156.
- [13] 杨玮, 刘江, 王婷. 密集存储系统建模与仿真[J]. 科学技术与工程, 2017, (23): 75-80.
- YANG Wei, LIU Jiang, WANG Ting. Modeling and simulation of compact storage system[J]. Science Technology and Engineering, 2017, (23): 75-80.
- [14] 胡运权. 运筹学基础及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- HU Yunquan. The basis and application of operations research [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1998.
-
- 作者简介: 秦彩云, 女, 1995 年出生。主要研究方向为自动化拣选系统, 物流系统调度与优化。
E-mail: qcy@mail.sdu.edu.cn
- 吴颖颖(通信作者), 女, 1985 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为分区自动拣选系统调度优化、物流系统规划、设计和仿真等。
E-mail: sophia.wu@sdu.edu.cn
- 吴耀华, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为自动分拣系统、集成化物流系统规划、设计, 仿真和物流技术装备等。
E-mail: yaohua.wu@sdu.edu.cn
- 刘紫薇, 女, 1996 年出生。主要研究方向为仓储拣选系统优化, 物流系统规划、设计和仿真等。
E-mail: ziwei.liu@mail.sdu.edu.cn